

氏名・(本籍)	たけ うち あき ひろ 竹 内 昭 洋
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2043号
学位授与年月日	平成15年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地学専攻
学位論文題目	Electrification Induced by Fracture or Frictional Slip of Rocks (岩石の破壊・摩擦すべりに伴う帯電)
論文審査委員	(主査) 教授 大槻 憲四郎 教授 橋本 哲夫(新潟大・理) 助教授 長濱 裕幸

論 文 目 次

1. Introduction
 - 1.1. Charge generation of rocks
 - 1.2. Charged point defect
 - 1.2.1. Metal-oxide-semiconductor device
 - 1.2.2. Thermoluminescence
 - 1.3. Seismo-electromagnetic phenomena
 - 1.4. Purpose
2. Voltage changes induced by stick-slips of granite and pegmatite quartz
 - 2.1. Stick-slips of granite with a contact-electrode
 - 2.1.1. Methods
 - 2.1.2. Results
 - 2.1.3. Asperity on slip plane
 - 2.2. Stick-slip tests of pegmatite quartz with a coil
 - 2.2.1. Methods
 - 2.2.2. Results
 - 2.2.3. Hertz dipole moment
3. Surface charge density
 - 3.1. Surface charging due to fracture or frictional slip
 - 3.2. Contact electrification
 - 3.3. Surface charging due to charged point defect
4. Al-hole centers in surface disordered layer
 - 4.1. Surface disordered layer
 - 4.2. Thermoluminescence measurement

- 4.2.1. Methods
- 4.2.2. Results
- 4.3. Disappearance of Al-hole center
- 5. Discussions
 - 5.1. Mechanism of surface electrification
 - 5.1.1. Disturbance of hole and electron released from charged point defects
 - 5.1.2. Separating of positive and negative charge
 - 5.1.3. Behavior of remained charge on sheared asperity
 - 5.1.4. Application to various minerals
 - 5.2. Application to seismo-electromagnetic phenomena
 - 5.2.1. Similarity and application
 - 5.2.2. Source of seismo-electromagnetic phenomena
 - 5.2.3. Scaling law
- 6. Conclusions

論文内容要旨

第一章 序論

岩石の破壊・摩擦すべりに伴い、帯電・電子やイオンの放出・発光・電磁放射が起こる。これら現象のメカニズムを説明するものとして、圧電効果による帯電・流動電位・摩擦電気が良く挙げられている。しかしながら、岩石の破壊・摩擦すべりに伴うこれら現象の詳しいメカニズムは未だによく分かっていない。

岩石鉱物は様々な荷電点欠陥を含んでいる。もし、これらの欠陥が移動するか電荷を放出すれば、圧電鉱物や水の存在といった条件に依存しない幅広い岩石の破壊・摩擦すべりに伴う帯電の原因になりうる可能性がある。一方、岩石の破壊・摩擦すべりに伴う帯電は実験室内だけで起こっているわけではない。地震に伴う電磁気現象（例えば、地震発光現象・異常電磁波放射）が何世紀も昔から報告されている。

本研究では、荷電点欠陥を基にした岩石の破壊・摩擦すべりに伴う帯電メカニズムを提唱する。更に、このメカニズムを自然の断層活動に応用し、地震に伴う電磁気現象の発生メカニズムを説明する。

第二章 花崗岩とペグマタイト石英のスティック・スリップに伴う電位変化

岩石・鉱物の破壊・摩擦すべりに伴う帯電の特性を得るため、三軸圧縮試験機を用いて花崗岩・ペグマタイト石英のスティック・スリップ実験を行った。

乾燥させた花崗岩サンプル（直径19.5mm・長さ60mm・予め中央を斜め45度に切断）を、封圧78.5MPa・歪速度 $10^{-3}/s$ ・室温で歪ませ、スティック・スリップに伴う電気シグナルをサンプルの側面に取り付けた電極により測定した。スティック・スリップと電気シグナルの強度はスティック・スリップが起こる度に増加した。幾つかのパラメータの比較から、電気シグナル強度は真の接触面積に比例していることが示唆された。

乾燥させたペグマタイト石英サンプル（直径19.5mm・長さ40mm・予め中央を斜め45度に切断）を、封圧78.5MPa・歪速度 $10^{-3}/s$ ・室温で歪ませ、スティック・スリップに伴う磁気シグナルをスティック・ス

リップ面の近傍に取り付けたソレノイド・コイルまたはトロイダル・コイルにより測定した。その結果から、この磁気シグナルが指向性を持ち、それが一組の電気双極子によって説明できることが分かった。一つはペグマタイト石英を構成する各石英の圧電効果による双極子の集合体で、スティック・スリップの衝撃による三軸圧縮試験機・その部品・サンプルの振動に呼応した振動をする電気双極子である。もう一つはスティック・スリップ面に垂直で、指数関数的に減衰する電気双極子である。後者はスティック・スリップ面上で剪断されたアスペリティー上の電荷によって形成されると考えられる。

第三章 表面電荷密度

岩石の破壊・摩擦すべりに伴う帯電メカニズムを定量的に議論するためには、破壊・摩擦すべり面上に現れる電荷の密度を求めることが重要である。

本スティック・スリップ実験と過去の岩石破壊・摩擦すべり実験データから、破壊・摩擦すべり面に発生する電荷の表面電荷密度が $10^{-1} \sim 10^2 \text{C/m}^2$ のオーダーであると計算された。更に、石英とその他の鉱物の接触により発生する接触電気の表面電荷密度もほぼ同様なオーダーであることを過去の研究から確認した。一方、シリコン基盤上の酸化膜 (SiO_2) に含まれる荷電点欠陥や、破壊された石英の表面に現れる不対電子の面密度から計算した表面電荷密度も同様なオーダーを示した。これらのことから、破壊・摩擦すべり・接触による帯電には荷電点欠陥に依存した共通のメカニズムが存在すると考えられる。

第四章 表面不整層のAI正孔捕獲中心

一般的に岩石の破壊・摩擦すべり面の結晶構造は不整であり、しばしばアモルファス層または攪乱層と呼ばれる。本研究では両方の意味を込めて表面不整層と呼ぶ。この層はスリップの際に剪断されたアスペリティー上や、すりつぶした粒子の表面にも形成される。石英は一般的に荷電点欠陥の一種であるAI正孔捕獲中心を含む。表面不整層におけるこの中心の存在状態・特性を調べることは、帯電と荷電点欠陥との関係を解明するために非常に重要である。そこで、AI正孔捕獲中心からの熱ルミネッセンス測定をすりつぶした様々なサイズ分布（ピーク粒径3.5, 4.3, 9.5, 69, 152 μm ）を持つペグマタイト石英粒子について行った。

表面不整層を持つ粒子・持たない粒子の両方において、粒径の減少に伴い単位質量当たりの熱ルミネッセンス強度が減少した。表面不整層を持つ粒子からの単位質量当たりの熱ルミネッセンス強度はより顕著に減少した。これら熱ルミネッセンス強度の粒径依存性は、粒界での熱ルミネッセンスの拡散と表面不整層におけるAI正孔捕獲中心の消滅によって理論的に説明できる。

表面不整層におけるAI正孔捕獲中心の構造は、サンプルのすりつぶしによって表面不整層が形成される際に破壊されていると考えられる。AI正孔捕獲中心の破壊は正孔の放出を伴う。よって、すりつぶしの際に、表面不整層ではAI正孔捕獲中心から放出された正孔が拡散されていると考えられる。また、石英にはAI正孔捕獲中心以外にもE'中心やperoxy中心といった荷電点欠陥が含まれている。よって、スティック・スリップの際に、表面不整層ではこれら荷電点欠陥の生成・破壊によって正孔・電子が放出されていると考えられる。

第五章 議論

母岩の石英は絶縁体であるが、表面不整層は多量の荷電点欠陥を含んでいるため、むしろ半導体的な特性を持つと考えられる。接している半導体と同様に、スティック・スリップ面上で接している二つの表面不整層は接触帯電を起こしていると考えられる。両者の違いは、前者の場合には電子がトンネル効果により接触面を移動するのに対し、後者は荷電点欠陥から放出された際の励起エネルギーで移動する

点にある。接触面で電気二重層を形成する電荷は、スティック・スリップによりアスペリティーが剪断され、接触面が僅かばかり分離した際に剪断されたアスペリティー上に取り残される。この様にしてスティック・スリップ面は帯電すると考えられる。

アスペリティー上だけでなく、一般的な破壊・摩擦すべり面上にも表面不整層が形成される。また、荷電点欠陥は様々な鉱物に含まれる。そこで、一般的に岩石の破壊・摩擦すべりに伴う帯電は、上述の帯電メカニズムによって説明することが出来る。一方、断層面上にも表面不整層が形成されているため、この帯電メカニズムが応用できる。そこで本研究では、この帯電メカニズムを基に、地震に伴い発生する電場・磁場と地震マグニチュードとのスケーリング則を提唱した。両スケーリング則の係数は共通で、アスペリティー分布のフラクタル次元に依存する。これらのスケーリング則は、自然データから得られたものと調和的である。

第六章 結論

花崗岩・ペグマタイト石英のスティック・スリップに伴い、指向性を持つ電磁気シグナルが発生した。本実験を含め、花崗岩・石英の破壊・摩擦すべり・接触面に現れる表面電荷密度は $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{C/m}^2$ のオーダーであり、表面に現れた荷電点欠陥から求めた表面電荷密度と調和的である。すりつぶしたペグマタイト石英粒子の熱ルミネッセンス測定により、表面不整層におけるAI正孔捕獲中心がすりつぶしの際に破壊されていることが分かった。そこで、荷電点欠陥から放出される電荷を基に、岩石の破壊・摩擦すべりに伴う帯電メカニズムを提唱した。このメカニズムを自然の断層活動に応用し、フラクタル分布を持つアスペリティーの破壊（地震）に伴い発生する電場・磁場と地震マグニチュードとのスケーリング則を提唱した。

論文審査の結果の要旨

岩石の破壊・摩擦すべりに伴う帯電現象を説明するものとして、圧電効果による帯電・流動電位・摩擦電気などが挙げられているが、詳しいメカニズムは良く分かっていない。竹内昭洋提出の本論文は、新しい岩石の破壊・摩擦すべりに伴う帯電メカニズムを提唱したものである。

これまで単発的な破壊に伴う電磁場変化・電磁シグナルの測定しか行われてこなかったが、本研究では、断続的に起こる固着すべりとそれに伴う電磁シグナルを連続的に測定することにより、固着すべりと電気シグナルの強度はスティック・スリップの度に共に増加することを発見した。この実験は時間分解能がまだ不十分であるものの、新たな知見である。

岩石の帯電メカニズム解明のために、半導体デバイスに含まれる荷電点欠陥の存在状態・特性に関する知見を取り入れるとともに、粉碎微粒子表面不整層内の荷電点欠陥の存在状態・特性を調べるために、熱ルミネッセンス測定を行った。その結果、不整層内のAI正孔捕獲中心はほぼ消滅しているということを知り、このAI正孔捕獲中心の消滅に伴う正孔の放出を地震に伴う電磁気現象の原因のひとつと考えた。この研究は地震に伴う電磁気現象に半導体関連の知見を導入した点で学際的・独創的である。

さらに本研究は、断層面不整層の帯電をもとに、電場・磁場と地震マグニチュードとのスケーリング則を提案した。これは、自然観測によって経験的に得られているスケーリング則と調和的である。

以上のように、本研究は論文提出者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、竹内昭洋提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。